

## CASE 1

## 波が運ぶ宇宙プラズマのエネルギー

広大な宇宙空間は希薄なプラズマ（イオンと電子）で満たされている。

その希薄さゆえにそれらの粒子は衝突することはほとんどない。

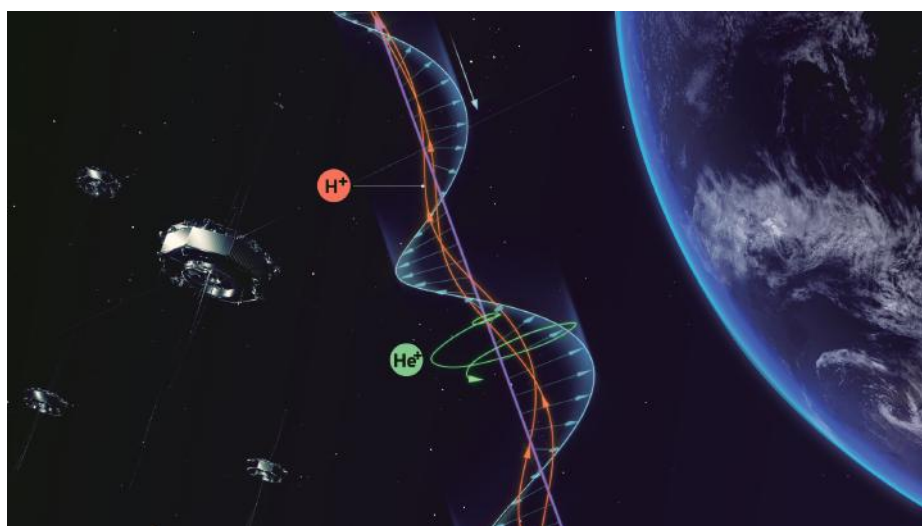
しかし、多くの粒子は集団としてふるまい、電磁場の波を生み出し、

その波がこんどは粒子の運動に影響を与える。粒子は触れ合うことなくエネルギーを伝え、

時にはひじょうに高いエネルギーをもつ粒子を生み出すこともある。

しかし、このような波を介した粒子間でのエネルギーの受け渡しは

理論的には50年以上研究されてきているが、直接観測はまだ実現されていなかった。



図：波（電磁イオンサイクロトロン波）とイオンの相互作用を計測するMMS衛星のイメージ

宇宙空間はプラズマで満たされているため、プラズマのふるまいを理解することが宇宙空間の理解の基礎となる。プラズマを構成する正の電荷をもったイオンは磁場の影響で旋回運動をし、旋回周期はイオンの質量が同じであれば磁場の強さで決まる。さまざまな種類のイオンは、通常は多数のイオンの粒子がバラバラの回転のタイミングで存在し、全体としては回転の軌道に沿ってほぼ均等になっている。しかし、これが不均一になり、電磁場の波を生成したり、波によって加速されたりと波とエネルギーをやり取りできる特徴的なふるまいをすることがある。これを観測で直接とらえてエネルギーの流れを証明することが、理論の正しさ、不十分さを理解するうえで次の重要なステップであった。しかし、そのためには波の周期（今回は約15秒）より十分短い時間で観測が行える粒子計測器が求められていた。2015年にNASAによって打ち上げられたMagnetospheric Multiscale (MMS) 衛星編隊にはこの条件を十分に満たせるデュアルイオンエネルギー分析器（0.15秒ごとに計測可能）が搭載された。この衛

星は国際協力のもとに実現されたもので、デュアルイオンエネルギー分析器は、日本で製作されたものだ。4衛星にそれぞれ4台ずつ、合計16台をフルに活用し、波動粒子相互作用解析手法<sup>注)</sup>によって波と一緒に変動するイオンの不均一をはっきりととらえ、水素イオンが波に、その波からヘリウムイオンへとエネルギーが渡っているシグナルの観測に成功した。このような波を介した粒子同士のエネルギーのやりとりは理論的には予想されていたが、観測でそのエネルギー輸送量が計測できたのは世界で初めてだ。

波を介したエネルギー交換や粒子加速は、たとえば、人工衛星に影響を与えるような高エネルギー電子の生成や、大気の超高層部分を加熱して酸素などの重いイオンを惑星から流出させる際にも重要な役割を果たしていると考えられ、他のさまざまな種類の波動や粒子の組み合わせのエネルギー交換の観測や現象の理解に向け、応用が可能となるように発展させていきたい。

本研究は、N. Kitamura *et al.*, *Science*, **361**, 1000 (2018) に掲載された。

(2018年9月11日プレスリリース)

注) 荷電粒子と波の詳細比較をし、エネルギーのやりとりを定量的に解析する手法。日本のあらせ衛星での電子と波の相互作用の研究に向け、日本がリードして手法確立や実証を行ってきており、今回は、より低周波数で、MMS衛星で可能な範囲となったイオンと波との相互作用に適用した。

## CASE 2

## 星の終活…大質量星からのガス放出現象の詳細

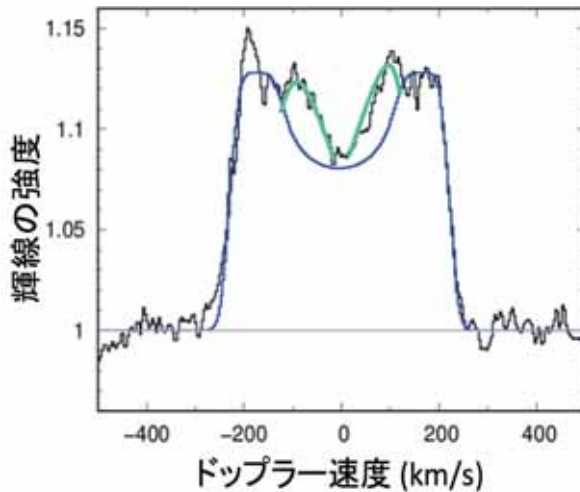
星はどのようにその一生を終えるのだろうか。

年老いた大質量星は、星内部の核融合反応による圧力によって、

ガスを宇宙空間にばらまきながら次第に痩せ細る。そして、最期は超新星爆発とともに華々しく散る。

今回われわれは、「終活」を始めたばかりの大質量星の様子を詳細に観測し、

ガス放出に伴う衝撃波の詳細を初めて解き明かすことに成功した。



読者の多くは、超新星爆発、あるいはブラックホールという言葉をごくどこかで聞いたことがあるだろう。簡単に言えば、太陽の数十倍の質量をもつような大質量星は、最終的に自らの重力を支えきれなくなって重力崩壊と超新星爆発を起こし、ブラックホールに姿を変え、その生涯を終える。だが、大質量星が安定した状態から超新星爆発を起こすようになる前までの経路、言うなれば星の「終活」、はこれほど単純ではなく、実にさまざまな段階を経る。そのうちのひとつ、大質量星が死ぬ準備を始めた時の姿が「高光度青色変光星」であり、本記事のメインピックである。

星の成長が進み星内部の核融合反応が強くなり始めると、まず星表面のガスがその圧力に押されて宇宙空間に放出されるようになり、星は痩せ細り始める。この段階の星を「高光度青色変光星」と呼び、星の表面からガスが大量に吹き飛んでいる様子が観測される。そのガス放出の程度は凄まじく、たった1万年で太陽の質量と同じだけの質量を失うほどである。なお、大質量星の典型的な寿命はおおよそ1000万年であり、これと比較すると1万年というのはまさにあっという間である。

今回われわれのグループは、地球からもっとも近くにある高光度青色変光星である「はくちょう座P星」の観測を行った。この天体は1600年に急激に明るくなったことで発見され、その後の詳細観測によってその時に大規模な爆発現象を起こしたことが、また現在に至るまでガス放出を続けていることが知られている。

この天体の0.91–1.36 $\mu\text{m}$  (マイクロメートル) の近赤外線波長域の観測データを解析する中で、われわれは1.26 $\mu\text{m}$ で観測される一回電離した鉄イオンの輝線に着目した。この輝線は、放出されるガスがつくる衝撃波によって生み出されていることが知られている。当初、この輝線は上述した1600年の爆発現象によって作られているのだろうと考えられていた。しかし、よく調べてみるとこの爆発現象だけでは観測されている鉄輝線の様子が全く説明つかないことが分かった。図は、鉄イオン輝線の世界プロファイルと言われるものである。横軸に輝線のドップラー速度、縦軸に輝線の強度を示している。光のドップラー効果によって、ガスが観測者から遠ざかるように動いていると発せられる光は赤くなり、反対に近づくように動いていると青くなる。よって、波長のずれを調べることでガスがどのような速度で動いているかが分かる。この速度プロファイルに、衝撃波から予想されるモデル線を重ねてみると、既知の爆発現象から放射される輝線は図中緑色で示したほんのわずかの要素しかなく、残りの大部分は別の場所から発せられていることがわかった。さらなる研究の結果、この残りの成分は星のごく近くから放射されていることが明らかになった。このような星のごく近くの衝撃波の存在は、これまで理論的には予測されていたが、今回の結果によって観測的に初めて存在が確認された。この結果によって、星の「終活」の様子がさらに詳しく調べられるようになった。

最後に、この研究にまつわる裏話をひとつ紹介したい。実はこの研究結果を記した論文は、学術誌に掲載を一度却下されている。この天体は天文学者で知らない人はいないほどの「超」有名天体であり、この星がどのようにガスを放出してどのような衝撃波をつくっているかなど、すでに知られ尽くしている、そんな天体で新たな衝撃波が見つかるはずなどないのだから解析が間違っているのだろう、という訳である。このような思い込みは往々にして人の目を曇らせる。掲載却下にめげずにさらなる証拠固めをした結果、無事に学術誌に掲載が認められたのであった。信念の勝利である。

本研究は、M. Mizumoto et al., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 431, 793 (2018) に掲載された。

(2018年9月12日プレスリリース)

図：鉄イオンの速度プロファイル。横軸はガスの運動速度で、観測者から遠ざかる方向を正の値としている。既知の爆発現象がつくる成分は緑色で示したごく一部分に過ぎず、青色で示した大部分の放射は、今回新たに見つかった星のごく近くの衝撃波によって作られている。

## CASE 3

### 未来の科学を創る新規分光計測

新しい計測法はそれまで観測が困難であった現象の計測を可能とし、新しい科学に取り組む機会を私たちに与えてくれる。  
新しい計測法が新しい科学を生み出してきたことは歴史が証明してきた事実であり、これは実験による実証に立脚する自然科学において本質的である。  
物理学の知識と経験を駆使すれば、  
未来の科学を支える新しい計測手法を開拓することができる。



私たちの身の回りは分子であふれている。たとえば、空気は窒素や酸素、二酸化炭素などの気体分子で構成されており、私たちの身体を構成する細胞の中にはさまざまな種類の生体分子がひしめき合っている。つまり、身の回りの自然を科学するにあたり、分子を計測することは本質的な重要性を持つ。光を分子に当てると分子の振動を誘発し、光が吸収される。各分子は固有の周期で振動するため、広い波長領域にわたる吸収スペクトル<sup>注</sup>を計測すればその種類を同定できる。分子がそれぞれ異なる分子振動スペクトルを持つことを人間の持つ指紋になぞらえて分子指紋ともよぶ。

光で分子振動スペクトルを計測する手法を分子分光法と呼び、標準的な手法としてフーリエ変換分光法が広く利用されている。この手法では計測試料に含まれる分子による吸収を受けた光を、干渉を用いた手法によって周波数分解（波長分解）してスペクトルを計測する。光の干渉を用いて周波数分解をするには、時間と周波数の間にあるフーリエ変換の関係を利用する。具体的には図左のような二つのアームを持つマイケルソン干渉計に光を導入し、いっぽうのアームの鏡を一定速度で平行移動させて得られる光の干渉時間波形をフーリエ変換することで周波数分解された光のスペクトルを得る。

広い分子振動スペクトルを簡便に得ることができるこの手法は過去 50 年にわたり使われ続けてきたが、その計測速度は鏡の機械的な移動速度で制限されており、1 秒間にせいぜい 10 回計測するのが限界であった。物理学の先端技術の知見を利用して、この計測速度の限界を突破し高速化することはできるだろうか？

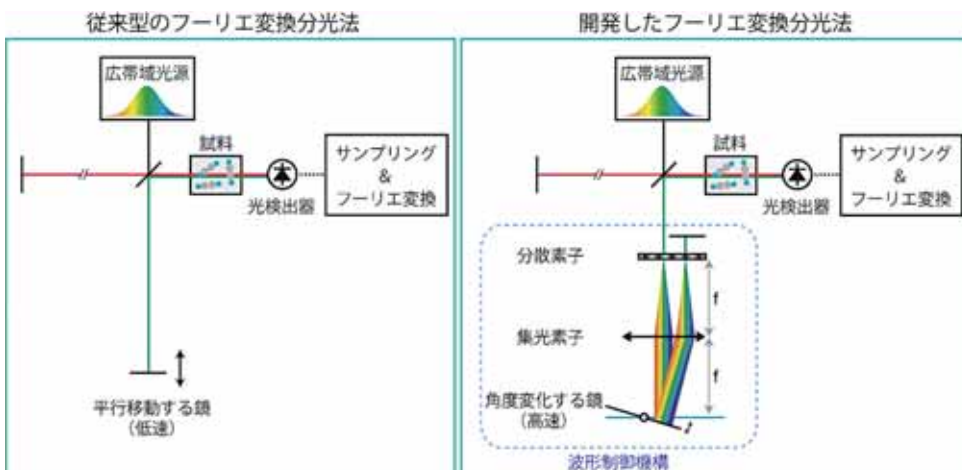
ここで視点を変えて、少し分野の異なる超短パルスレーザーを用いた先端光技術に目を向けてみよう。この分野で良く知られている技術として、光の波形を自在に制御するパルス波形制御とよばれる技術がある。われわれは、一見関係のなさそうに思えるこの波形制御技術とフーリエ変換分光法との間に親和性を見出し、上記の計測速度の限界を突破する新手法を開発した。具体的には、図右に示すように、鏡を平行移動する部分を波形制御の光学系に置き換え、そこに高速に角度変化する鏡を導入することで干渉波形の取得レートを高めることに成功した。このわずかな工夫により、計測速度は 1000 倍向上し、1 秒間に 1 万回計測することが可能となった。

本研究のように最先端技術の知見をもって従来の計測法を再考すると、劇的な性能向上を達成できることがある。最先端技術と計測法の背景にあ

る物理を深く理解し、考えを巡らせることで洞察が生まれ、このような結果が得られる。こうして開発された高性能計測法はこれまでに観測されなかった現象の計測を可能とし、新しい科学に挑戦するきっかけを与えてくれるであろう。

本研究は、K. Hashimoto *et al.*, *Nature Communications*, 9, 4448 (2018) に掲載された。  
(2018 年 10 月 25 日プレスリリース)

図：(左) 従来型のフーリエ変換分光法 (右) 開発したフーリエ変換分光法



注) スペクトルとは光の波長分布のこと